文章编号:1000-4939(2024)02-0318-12

鳍条效应软体采摘机械手建模与试验

易伯阳,周俊,张震,江自真,张保华

(南京农业大学工学院,210031 南京)

摘　要:针对现有鳍条效应软体手指建模分析方法难以兼顾高精度与小运算量的问题,本研究以课题组设计的苹果采摘软体机械手为对象,在观察软体手指变形的基础上,提出将鳍条效应软体手指等效为串连铰链四杆机构;运用虚功原理推导了给定变形状态下软体手指各处接触力与驱动力矩计算方法;提出用线弹性扭簧模型描述变形恢复力矩,利用改进的粒子群算法求解各级四杆机构扭簧劲度系数;基于有限元模型,结合二次开发建立了给定关节转角和充气压力下驱动力矩的 BP 神经网络静态模型。搭建试验平台对 3 个不同大小的仿真苹果在 3 个不同高度位置下进行抓取力测量试验。试验结果表明,所建立的力学模型计算抓取力相对误差绝对值小于 8.6%,与有限元模型精度相当;驱动力矩测量试验结果表明关节神经网络模型计算值与测量值变化趋势相同,相对误差小于 12.7%。

关键词:软体机械手;鳍条效应;虚功原理;有限元分析;粒子群算法

中图分类号:TP241　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.006

Modeling and experiment of soft robotic picking hand based on fin ray effect

YI Boyang, ZHOU Jun, ZHANG Zhen, JIANG Zizhen, ZHANG Baohua

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, 210031 Nanjing, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult for the existing modeling and analysis methods of soft finger based on fin ray effect to meet the requirements of high precision and small amounts of calculation, we proposed approximately regarding the soft finger as concatenated four-bar mechanisms by observing the soft finger deformation. The theoretical model to solve contact force and actuating torque was established based on the principle of virtual work when the deformation state is given. The deformation recovery torque was modeled using linearly elastic torsional spring, and then an improved particle swarm algorithm was programmed to solve the stiffness coefficient of the torsional spring of each phalanx. Based on the Abaqus finite element model and combined with the secondary development, the relationship between actuating torque and pressure, joint angle was obtained, and then fitted with the aid of BP neural network. Last, an experiment platform was built to measure the grip force of the soft robotic picking hand. The results showed

收稿日期:2021-10-23　　**修回日期**:2022-11-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 31901415);江苏省重点研发计划资助项目(No. BE2017370)
通信作者:周俊,教授。E-mail:zhoujun@njau.edu.cn
引用格式:易伯阳,周俊,张震,等. 鳍条效应软体采摘机械手建模与试验[J]. 应用力学学报,2024,41(2):318-329.
YI Boyang, ZHOU Jun, ZHANG Zhen, et al. Modeling and experiment of soft robotic picking hand based on fin ray effect[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(2):318-329.

that the absolute relative error of the model was less than 8.6%, which was equivalent to that of the finite element model. The values of actuating torque calculated by BP neural network shared the same trend with the values measured and the relative error was under 12.7%.

Key words: soft robotic hand; fin ray effect; principle of virtual work; finite element analysis; particle swarm algorithm

软体机械手凭借良好的柔顺性和适应性,在非结构化环境中可以对形状复杂、大小不一的对象实现刚性机械手难以完成的安全可靠抓取,具有较高的研究价值[1-14]。其中以鱼鳍为灵感的鳍条效应软体手指[14]因其特殊的被动包络力学特性,且制作简单,扩展、通用性好,在诸多领域得到了广泛的应用。HEMMING 等[15]开发了一种用于温室环境采摘甜椒的机器人,工作时鳍条效应软体手指夹持住甜椒后,利用刀片切断果梗完成采摘;KÖLLE 等[16]设计了一种基于鳍条效应的持物镊,用于处理血管、神经和软组织等脆弱的生物结构;FISCHINGER 等[17]将鳍条效应软体机械手作为看护机器人的末端执行器,可以完成对生活中常见物品的拿取摆放等动作,协助行动不便的用户。

这些研究通常仅将鳍条效应软体机械手作为其整机设计的一部分,进行简单的设计应用,对机械手的抓取性能并未进行深入研究。在自动化收获过程中,机械手抓取力控制作为末端执行器研究的关键技术之一,对实现无损采摘具有重要意义。SHAN 等[18]建立了鳍条效应软体手指伪刚体模型,可以较好地描述软体手指变形和力,但该模型依赖大量的输入数据,形式复杂,故主要用于结构优化;针对常见的力传感器难以安装在软体手指上的问题,EL-GENEIDY 等[19]和 XU 等[20]分别将传感器安装于机械臂末端和抓取对象表面,分析鳍条效应软体手指输出力与驱动位移的关系,但实际采摘中果实的形状尺寸,与机械手的相对位置都是事先未知且变化的。某种意义上鳍条效应软体手指和欠驱动手指[21]均为自由度数目大于驱动数目的机构,具有类似的被动适应原理,然而后者仍属于刚性机械手范畴,复杂度与前者存在较大差距。目前有限元方法发展已较为成熟,分析参数设置正确时其结果具有较高的可信度[22-23],但受较高的计算成本限制,难以作为实时反馈控制的手段。

此前的力学模型或有较多简化,忽略了抓取对象几何和位置的多样性,或形式复杂计算量大,不适用于实时控制。本研究在此前研究的基础上,以课题组设计的鳍条效应软体采摘机械手为对象,观察软体手指接触物体受力变形状况,提出将软体手指等效为串连铰链四杆机构;结合虚功原理和改进的粒子群算法建立了鳍条效应软体手指力学模型,利用有限元模型和二次开发,运用 BP 神经网络对驱动力矩进行拟合建模;最后搭建试验平台测量采摘机械手对仿真苹果的抓取力以及关节的驱动力矩,检验所建立力学模型的准确性。

1　软体采摘机械手设计

1.1　采摘机械手整体结构

图 1 展示了采摘机械手装配结构,机械手包括基座、气动弯曲关节、鳍条效应软体手指等部件。工作时,气动弯曲关节柔性波纹管充气伸长,驱动上连杆相对下连杆转过一角度,带动软体手指绕弯曲关节转轴旋转动作,鳍条效应软体手指从下向上逐渐贴合至苹果表面形成被动包络式抓取,然后通过采摘机械手旋转来扭断果梗实现果实果梗的分离,最后滑台气缸伸出,苹果从三指形成的包络空间底部落入与基座底部孔洞相连的收集管中,完成收获。

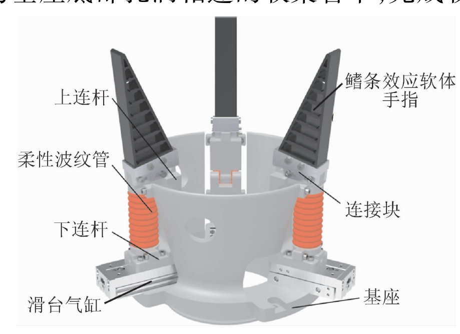


图 1　鳍条效应软体采摘机械手模型

Fig. 1　Soft robotic picking hand based on FRE

1.2　软体手指结构与材料

基于鳍条效应原理,利用仿生学方法设计的软体手指采用“V 形”对称结构,定义采摘时与苹果相接触的一面为前面,另一面为后面。软体手指前面后面之间等间隔地设有连接两者的横梁。根据苹果大小,本研究设计软体手指高 90 mm,底宽 36 mm,经验表明,软体手指横梁数目过少会导致手指抓持能力下降以及包络抓取时接触面各位置压力分布不

均,过多则会影响软体手指被动包络的性能,故最终决定软体手指横梁数为 9,其中定义安装端即与连接块相固连的横梁为第 1 级,末端即最靠近指尖的横梁为第 9 级。软体手指采用硅胶材料通过浇筑法制作,按照国标 GB/T 528—92 制作硅胶拉伸试样,使用 CMT6104 型电子万能试验机进行单轴拉伸试验,选用二参数 Mooney-Rivlin 本构模型[24-27],对原始数据计算处理后通过 Matlab 曲线拟合工具箱拟合得到本构模型参数 $C_{10}=1.267$ MPa, $C_{01}=1.329$ MPa,试验曲线和拟合曲线如图 2 所示。

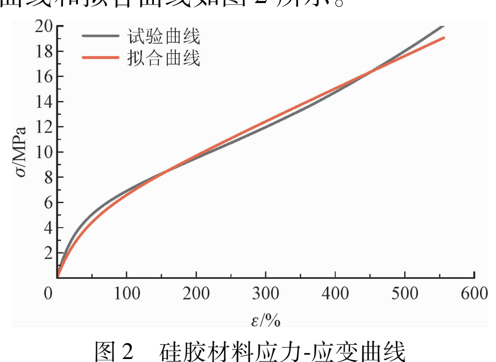


图 2　硅胶材料应力-应变曲线

Fig. 2　Stress-strain curve of silicone material

2　软体手指力学模型

2.1　基于虚功原理的接触力计算

用于软体手指制作的硅胶材料具有较强的非线性,且软体手指自身结构复杂,结合了材料与结构双重非线性的鳍条效应软体手指理论上具有无限多的自由度。观察图 3(a)软体手指与直径 90 mm 球体接触有限元仿真 Mises 应力云图,不难发现软体手指变形主要发生在横梁两端与前、后面的连接处,以图 3(b)所示软体手指第 5 级横梁处为例,横梁两端与前、后面的连接位置 1 处应力为 5.65 MPa,位置 3 处为 4.37 MPa,其他位置如 2 处为 1.13 MPa,位置 4 处为 0.03 MPa。忽略横梁两端与前、后面的连接处外其他位置的变形,对软体手指进行伪刚性段划分,得到图 4 所示的力学模型,划分后 $n+1$ 横梁鳍条效应软体手指等效为 n 级串连铰链四杆机构,对这些四杆机构由软体手指安装端到末端从 1 到 n 依次编号。

根据平面机构自由度计算公式,n 级串连铰链四杆机构具有 $n+1$ 个自由度。如图 4(a)所示,设第 i 级四杆机构前、上、后、下杆长度分别为 l_{fi}、l_{ci+1}、l_{bi} 和 l_{ci},某一时刻,可以通过给定第 1 级下杆与地面夹角 θ_{a1} 和各级前杆与地面夹角 $\theta_{f1},\theta_{f2},\cdots,\theta_{fn}$,共 $n+1$ 个变量来确定各级后杆与地面夹角 $\theta_{b1},\theta_{b2},\cdots,\theta_{bn}$ 和各级上杆与地面夹角 $\theta_{a2},\theta_{a3},\cdots,\theta_{an},\theta_{an+1}$。($\theta_{ai+1}$ 为第 i 级四杆机构上杆与地面夹角,第 i 级四杆机构上杆为第 $i+1$ 级四杆机构下杆,此处 $i=1,2,\cdots,n-1$,如未经特殊说明,本研究默认 $i=1,2,\cdots,n$)。

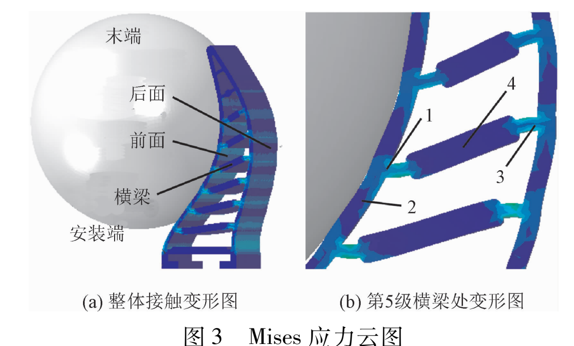


图 3　Mises 应力云图

Fig. 3　Mises stress contour plot

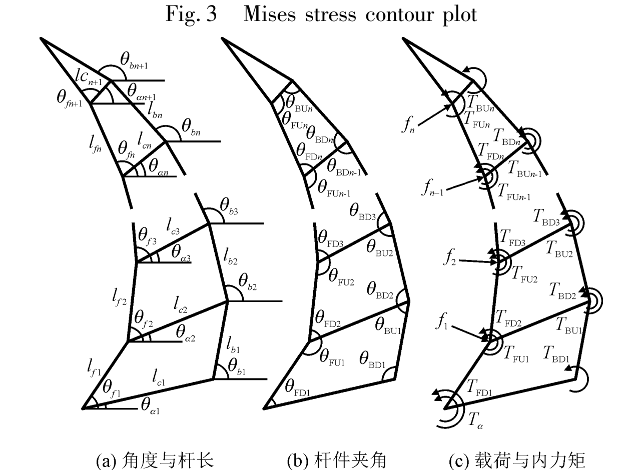


图 4　软体手指力学模型

Fig. 4　Statics model of fin-ray effector

实际采摘过程中,鳍条效应软体手指前面与苹果为连续的接触,苹果对软体手指前面的压强在前面与横梁连接的位置处数值较大,将软体手指前面连续分布的压强离散化为图 4(c)所示的一系列压力 $f_1,f_2,\cdots,f_n$,压力 f_i 的作用点为第 i 级四杆机构前杆与上杆的铰接处,方向为第 i 级四杆机构前杆法线和第 $i+1$ 级四杆机构前杆法线的角平分线。软体手指抓取苹果产生变形后,手指内部有恢复无载荷时初始形态的趋势,将软体手指等效为串连铰链四杆机构后,可视为各杆件受到使机构恢复初始状态的内力矩,这些内力矩成对作用在各级四杆机构前下杆、前上杆、后上杆和后下杆之间,两两之间大小相等,方向相反,相互抵消。以鳍条效应软体采摘机械手握拢为虚运动正方向,根据虚功原理,有

$$\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}\delta\boldsymbol{V}-T_a\delta\dot{\theta}_{a1}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{FD}}^{\mathrm{T}}\delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{FD}}+\boldsymbol{T}_{\mathrm{FU}}^{\mathrm{T}}\delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{FU}}+\boldsymbol{T}_{\mathrm{BU}}^{\mathrm{T}}\delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{BU}}+\boldsymbol{T}_{\mathrm{BD}}^{\mathrm{T}}\delta\dot{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{BD}} \tag{1}$$

其中

$\boldsymbol{f}=(f_1\quad f_2\quad f_3\quad\cdots\quad f_n)^{\mathrm T}$,

$\delta\boldsymbol{V}=(\delta\boldsymbol{V}_1\quad\delta\boldsymbol{V}_2\quad\delta\boldsymbol{V}_3\quad\cdots\quad\delta\boldsymbol{V}_n)^{\mathrm T}$,

$\boldsymbol{T}_{\mathrm{FD}}=(T_{\mathrm{FD1}}\quad T_{\mathrm{FD2}}\quad T_{\mathrm{FD3}}\quad\cdots\quad T_{\mathrm{FD}n})^{\mathrm T}$,

$\boldsymbol{T}_{\mathrm{FU}}=(T_{\mathrm{FU1}}\quad T_{\mathrm{FU2}}\quad T_{\mathrm{FU3}}\quad\cdots\quad T_{\mathrm{FU}n})^{\mathrm T}$,

$\boldsymbol{T}_{\mathrm{BU}}=(T_{\mathrm{BU1}}\quad T_{\mathrm{BU2}}\quad T_{\mathrm{BU3}}\quad\cdots\quad T_{\mathrm{BU}n})^{\mathrm T}$,

$\boldsymbol{T}_{\mathrm{BD}}=(T_{\mathrm{BD1}}\quad T_{\mathrm{BD2}}\quad T_{\mathrm{BD3}}\quad\cdots\quad T_{\mathrm{BD}n})^{\mathrm T}$,

$\delta\dot{\boldsymbol\theta}_{\mathrm{FD}}=(\delta\dot\theta_{f1}-\delta\dot\theta_{a1},\delta\dot\theta_{f2}-\delta\dot\theta_{a2},\cdots,\delta\dot\theta_{fn}-\delta\dot\theta_{an})^{\mathrm T}$,

$\delta\dot{\boldsymbol\theta}_{\mathrm{FU}}=(\delta\dot\theta_{f1}-\delta\dot\theta_{a2},\delta\dot\theta_{f2}-\delta\dot\theta_{a3},\cdots,\delta\dot\theta_{fn}-\delta\dot\theta_{an+1})^{\mathrm T}$,

$\delta\dot{\boldsymbol\theta}_{\mathrm{BU}}=(\delta\dot\theta_{b1}-\delta\dot\theta_{a2},\delta\dot\theta_{b2}-\delta\dot\theta_{a3},\cdots,\delta\dot\theta_{bn}-\delta\dot\theta_{an+1})^{\mathrm T}$,

$\delta\dot{\boldsymbol\theta}_{\mathrm{BD}}=(\delta\dot\theta_{b1}-\delta\dot\theta_{a1},\delta\dot\theta_{b2}-\delta\dot\theta_{a2},\cdots,\delta\dot\theta_{bn}-\delta\dot\theta_{an})^{\mathrm T}$

式中:$\boldsymbol{f}$ 为各级压力矢量 $\boldsymbol{f}_i$ 组成的矩阵;$\delta\boldsymbol{V}$ 为各级压力作用点虚速度矢量 $\delta\boldsymbol{V}_i$ 组成的矩阵;T_a 为驱动力矩;$\delta\dot\theta_{a1}$ 为第 1 级下杆虚角速度;$\boldsymbol{T}_{\mathrm{FD}}$ 为各级前下杆恢复力矩 $T_{\mathrm{FD}i}$ 组成的矩阵;$\boldsymbol{T}_{\mathrm{FU}}$ 为各级前上杆恢复力矩 $T_{\mathrm{FU}i}$ 组成的矩阵;$\boldsymbol{T}_{\mathrm{BU}}$ 为各级后上杆恢复力矩 $T_{\mathrm{BU}i}$ 组成的矩阵;$\boldsymbol{T}_{\mathrm{BD}}$ 为各级后下杆恢复力矩 $T_{\mathrm{BD}i}$ 组成的矩阵;$\delta\dot{\boldsymbol\theta}_{\mathrm{FD}}$ 为各级前下杆夹角变化虚角速度 $\delta\dot\theta_{\mathrm{FD}i}$ 组成的矩阵;$\delta\dot{\boldsymbol\theta}_{\mathrm{FU}}$ 为各级前上杆夹角变化虚角速度 $\delta\dot\theta_{\mathrm{FU}i}$ 组成的矩阵;$\delta\dot{\boldsymbol\theta}_{\mathrm{BU}}$ 为各级后上杆夹角变化虚角速度 $\delta\dot\theta_{\mathrm{BU}i}$ 组成的矩阵;$\delta\dot{\boldsymbol\theta}_{\mathrm{BD}}$ 为各级后下杆夹角变化虚角速度 $\delta\dot\theta_{\mathrm{BD}i}$ 组成的矩阵;$\delta\dot\theta_{fi}$ 为第 i 级前杆虚角速度;$\delta\dot\theta_{bi}$ 为第 i 级后杆虚角速度;$\delta\dot\theta_{ai+1}$ 为第 i 级上杆虚角速度。

根据前文连续压强离散化为压力的方法,有压力 f_i 的方向为 $\left(\sin\dfrac{\theta_{fj}+\theta_{fj+1}}{2},\ -\cos\dfrac{\theta_{fj}+\theta_{fj+1}}{2}\right)$,则

$$V_i=\left(-\sum_{j=1}^{i}l_{fj}\sin\theta_{fj}\delta\dot\theta_{fj},\ \sum_{j=1}^{i}l_{fj}\cos\theta_{fj}\delta\dot\theta_{fj}\right)\qquad(2)$$

如图 5 所示,分析第 i 级四杆机构各杆虚角速度之间的关系,根据三心定理,有

$$\delta\dot\theta_{ai+1}=(1+M_i)\delta\dot\theta_{ai}-M_i\delta\dot\theta_{fi}\qquad(3)$$

$$\delta\dot\theta_{bi}=N_i\delta\dot\theta_{fi}+(1-N_i)\delta\dot\theta_{ai}\qquad(4)$$

式中:$M_i=\dfrac{l_{fi}}{h_{fi}}$;$N_i=\dfrac{h_{ci}}{h_{ci}+l_{ci}}$;$h_{fi}$ 为第 i 级四杆机构前后杆的延长线交点与前上杆交点的距离;h_{ci} 为第 i 级四杆机构上下杆的延长线交点与前下杆交点的距离。

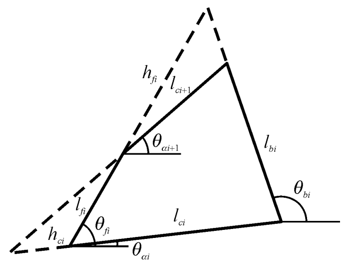


图 5　四杆机构运动学模型

Fig. 5　Kinematic model of four-bar mechanism

根据正弦定理,有

$$h_{fi}=\frac{l_{ci+1}\sin(\delta\theta_{bi}-\delta\theta_{ai+1})}{\sin(\delta\theta_{bi}-\delta\theta_{fi})}\qquad(5)$$

$$h_{ci}=\frac{l_{ci}\sin(\delta\theta_{fi}-\delta\theta_{ai+1})}{\sin(\delta\theta_{ai+1}-\delta\theta_{ai})}\qquad(6)$$

将式(2)代入式(1),将式(5)、(6)分别代入式(3)、(4)后再代入式(1),得

$$\boldsymbol{F}^{\mathrm T}=(\boldsymbol{T}_{\mathrm{FD}}^{\mathrm T}\boldsymbol{T}_1+\boldsymbol{T}_{\mathrm{FU}}^{\mathrm T}\boldsymbol{T}_2+\boldsymbol{T}_{\mathrm{BU}}^{\mathrm T}\boldsymbol{T}_3+\boldsymbol{T}_{\mathrm{BD}}^{\mathrm T}\boldsymbol{T}_4)(\boldsymbol{T}_5)^{-1}\qquad(7)$$

其中 $\boldsymbol{F}=(-T_a\quad f_1\quad f_2\quad f_3\quad\cdots\quad f_n)^{\mathrm T}$,

$\delta\dot{\boldsymbol\theta}=(\delta\dot\theta_{a1}\quad\delta\dot\theta_{f1}\quad\delta\dot\theta_{f1}\quad\cdots\quad\delta\dot\theta_{fn})^{\mathrm T}$

$\boldsymbol{T}_1$、$\boldsymbol{T}_2$、$\boldsymbol{T}_3$、$\boldsymbol{T}_4$、$\boldsymbol{T}_5$ 为线性变换矩阵,分别为

$$\boldsymbol{T}_1=\begin{pmatrix}-1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0\\ -(1+M_1) & M_1 & 1 & 0 & \cdots & 0\\ -(1+M_2)(1+M_1) & (1+M_2)M_1 & M_2 & 1 & \cdots & 0\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ -\prod_{i=1}^{n-1}(1+M_i) & \left[\prod_{i=2}^{n-1}(1+M_i)\right]M_1 & \left[\prod_{i=3}^{n-1}(1+M_i)\right]M_2 & \left[\prod_{i=4}^{n-1}(1+M_i)\right]M_3 & \cdots & 1\end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{T}_2=\begin{pmatrix}-(1+M_1) & 1+M_1 & 0 & 0 & \cdots & 0\\ -(1+M_2)(1+M_1) & (1+M_2)M_1 & 1+M_2 & 0 & \cdots & 0\\ -(1+M_3)(1+M_2)(1+M_1) & (1+M_3)(1+M_2)M_1 & (1+M_3)M_2 & 1+M_3 & \cdots & 0\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ -\prod_{i=1}^{n}(1+M_i) & \left[\prod_{i=2}^{n}(1+M_i)\right]M_1 & \left[\prod_{i=3}^{n}(1+M_i)\right]M_2 & \left[\prod_{i=4}^{n}(1+M_i)\right]M_3 & \cdots & 1+M_n\end{pmatrix},$$

$$
\boldsymbol{T}_3=\begin{pmatrix}
-(N_1+M_1) & N_1+M_1 & 0 & 0 & \cdots & 0\\
-(N_2+M_2)(1+M_1) & (N_2+M_2)M_1 & N_2+M_2 & 0 & \cdots & 0\\
-(N_3+M_3)(1+M_2)(1+M_1) & (N_3+M_3)(1+M_2)M_1 & (N_3+M_3)M_2 & N_3+M_3 & \cdots & 0\\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\
-(N_n+M_n)\prod_{i=1}^{n-1}(1+M_i) & (N_n+M_n)[\prod_{i=2}^{n-1}(1+M_i)]M_1 & (N_n+M_n)[\prod_{i=3}^{n-1}(1+M_i)]M_2 & (N_n+M_n)[\prod_{i=4}^{n-1}(1+M_i)]M_3 & \cdots & N_n+M_n
\end{pmatrix},
$$

$$
\boldsymbol{T}_4=\begin{pmatrix}
-N_1 & N_1 & 0 & 0 & \cdots & 0\\
-N_2(1+M_1) & N_2M_1 & N_2 & 0 & \cdots & 0\\
-N_3(1+M_2)(1+M_1) & N_3(1+M_2)M_1 & N_3M_2 & N_3 & \cdots & 0\\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\
-N_n\prod_{i=1}^{n-1}(1+M_i) & N_n[\prod_{i=2}^{n-1}(1+M_i)]M_1 & N_n[\prod_{i=3}^{n-1}(1+M_i)]M_2 & N_n[\prod_{i=4}^{n-1}(1+M_i)]M_3 & \cdots & N_n
\end{pmatrix},
$$

$$
\boldsymbol{T}_5=\begin{pmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0\\
0 & l_{f1}\cos\left(\frac{\theta_{f1}+\theta_{f2}}{2}-\theta_{f1}\right) & 0 & 0 & \cdots & 0\\
0 & l_{f1}\cos\left(\frac{\theta_{f2}+\theta_{f3}}{2}-\theta_{f1}\right) & l_{f2}\cos\left(\frac{\theta_{f2}+\theta_{f3}}{2}-\theta_{f2}\right) & 0 & \cdots & 0\\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\
0 & l_{f1}\cos\left(\frac{\theta_{fn}+\theta_{fn+1}}{2}-\theta_{f1}\right) & l_{f2}\cos\left(\frac{\theta_{fn}+\theta_{fn+1}}{2}-\theta_{f2}\right) & l_{f3}\cos\left(\frac{\theta_{fn}+\theta_{fn+1}}{2}-\theta_{f3}\right) & \cdots & l_{fn}\cos\left(\frac{\theta_{fn}+\theta_{fn+1}}{2}-\theta_{fn}\right)
\end{pmatrix}
$$

经过等效后，根据式(7)即可求解软体手指给定变形状态下各处的接触力及需要的驱动力矩，为了验证公式的正确性，在虚拟样机软件 ADAMS 中建立如图6(a)所示的串连铰链四杆机构模型，在各级四杆机构杆件间设置线弹性扭簧连接以产生软体手指变形恢复力矩，扭簧劲度系数暂随意设置以供计算，本研究取各扭簧劲度系数为0.4 N·mm/°，气动弯曲关节对软体手指的驱动力矩则通过在第1级横梁和地面间设置一负刚度扭簧进行模拟。在各级前杆施加跟随部件旋转的压力，需要注意的是，为了使压力 f_i 方向为第 i 级前杆法线和第 $i+1$ 级前杆法线的角平分线，于 ADAMS 模型中将各处压力拆解为作用于第 i 级前杆与上杆的铰接处，大小相等均为 $\frac{f_{\mathrm{ADAMS}\ i}}{2}$，方向分别为第 i 级前杆法线和第 $i+1$ 级前杆法线的两个力，两个力等效的压力 f_i 大小为 $f_{\mathrm{ADAMS}\ i}\cos\left(\frac{\theta_{fi+1}-\theta_{fi}}{2}\right)$，提交静态分析运算，结果如图6(b)所示。将计算得到的串连铰链四杆机构变形状态输入式(7)反求各处接触力，与 ADAMS 软件中对应的等效压力载荷大小一致，驱动力矩等于负刚度扭簧劲度系数绝对值乘以第1级横梁转角，因此可确定公式推导正确。

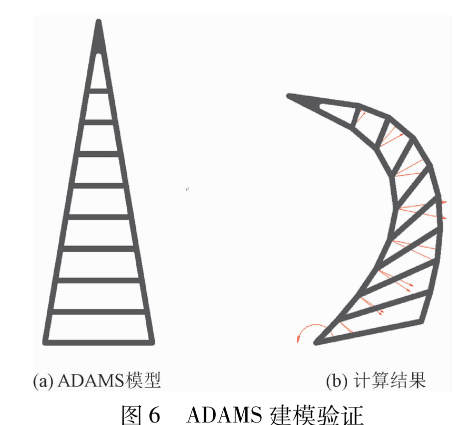


图6 ADAMS 建模验证

Fig. 6 Validation using ADAMS model

2.2 基于粒子群算法的扭簧劲度系数优化

根据式(7)，想要计算软体手指工作时各处的接触力，需要知道软体手指几何参数、变形状态和变形恢复力矩。几何参数和变形状态可以通过观察测量得到，恢复力矩则与材料、结构和各位置的变形大小有关，无法直接测得。根据2.1节，各级四杆机构前下杆、前上杆、后上杆和后下杆两两铰接，且两两间存在迫使杆件恢复无载荷时相对位置的内力矩。内力矩可以视为各级前下杆、前上杆、后上杆和后下杆铰链处安装有扭簧扭转后产生的。扭簧的力学特性可通过线弹性模型描述，为了简化分析，认为同级

四杆机构中各处扭簧劲度系数相等。

ABAQUS 作为成熟的商用软件,其建立的有限元模型具有较高的可信度,软体手指利用本研究方法和有限元方法得到的两种模型,其特性应该相近,本研究以此为目标,寻求一种扭簧劲度系数的求解方法。建立如图 7 所示的有限元模型,与 2.1 节用 ADAMS 软件验证力学模型相似,该有限元模型通过施加力载荷得到变形,设定安装端第 1 级横梁为完全固定约束,于软体手指前面和每一级横梁的连接处施加垂直于前面,跟随结点旋转的接触力,提交运算得到软体手指变形。$\boldsymbol{T}_1$、$\boldsymbol{T}_2$、$\boldsymbol{T}_3$、$\boldsymbol{T}_4$ 均删去第 1 列得到 $\boldsymbol{T}_1'$、$\boldsymbol{T}_2'$、$\boldsymbol{T}_3'$、$\boldsymbol{T}_4'$,$\boldsymbol{T}_5$ 删去第 1 行和第 1 列得到 $\boldsymbol{T}_5'$,$\boldsymbol{F}$ 删去第 1 行得到 $\boldsymbol{f}$,至此式(7)变为

$$\boldsymbol{f}=(\boldsymbol{T}_{\mathrm{FD}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_1'+\boldsymbol{T}_{\mathrm{FU}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_2'+\boldsymbol{T}_{\mathrm{BU}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_3'+\boldsymbol{T}_{\mathrm{BD}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_4')(\boldsymbol{T}_5')^{-1} \quad (8)$$

第 i 级四杆机构前下杆、前上杆、后上杆、后下杆间的夹角变化量分别为 $\Delta\theta_{\mathrm{FD}i}$、$\Delta\theta_{\mathrm{FU}i}$、$\Delta\theta_{\mathrm{BU}i}$、$\Delta\theta_{\mathrm{BD}i}$,扭簧劲度系数为 K_i,有

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{T}_{\mathrm{FD}} &= (K_1\Delta\theta_{\mathrm{FD1}} \quad K_2\Delta\theta_{\mathrm{FD2}} \quad \cdots \quad K_8\Delta\theta_{\mathrm{FD8}})^{\mathrm{T}},\\
\boldsymbol{T}_{\mathrm{BU}} &= (K_1\Delta\theta_{\mathrm{BU1}} \quad K_2\Delta\theta_{\mathrm{BU2}} \quad \cdots \quad K_8\Delta\theta_{\mathrm{BU8}})^{\mathrm{T}},\\
\boldsymbol{T}_{\mathrm{FU}} &= (K_1\Delta\theta_{\mathrm{FU1}} \quad K_2\Delta\theta_{\mathrm{FU2}} \quad \cdots \quad K_8\Delta\theta_{\mathrm{FU8}})^{\mathrm{T}},\\
\boldsymbol{T}_{\mathrm{BD}} &= (K_1\Delta\theta_{\mathrm{BD1}} \quad K_2\Delta\theta_{\mathrm{BD2}} \quad \cdots \quad K_8\Delta\theta_{\mathrm{BD8}})^{\mathrm{T}}
\end{aligned} \quad (9)$$

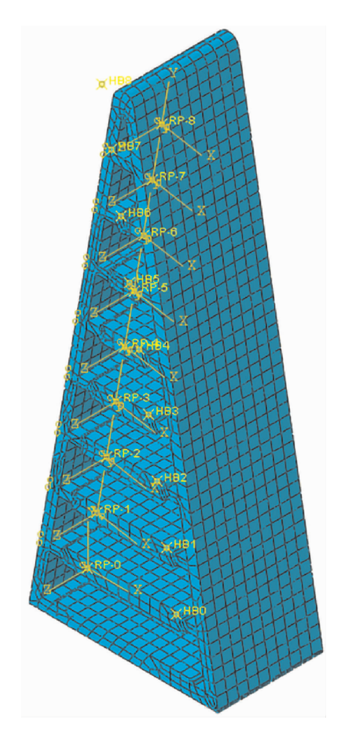


图 7　有限元模型

Fig. 7　ABAQUS model

给定 1 组变形状态与对应的接触力,K_1,K_2,…,K_8 为未知量,式(8)为包含 8 个方程的线性方程组,根据克拉默法则方程组有且仅有一组解。然而,仅靠一组变形状态与对应的接触力求得的劲度系数,只能使力学模型等效该变形状态下软体手指的力学特性。为了使力学模型能够良好地模拟软体手指在各种变形程度下的力学特性,在有限元模型中施加 25 组不同的接触力载荷,求解得到对应的 25 组变形状态。8 个未知量,200 个方程,对于这样的超定方程组问题,考虑采用粒子群算法优化求解。以式(10),即力学模型在图 8 所示 25 组变形状态下计算所得各位置接触力与对应的有限元模型接触力载荷差值的绝对值之和作为适应度函数进行最小值优化,这样求解出的扭簧劲度系数,可以使力学模型与有限元模型更好的相近。

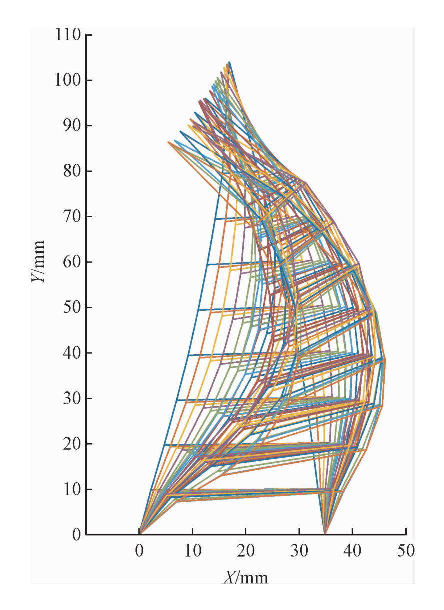


图 8　25 组变形状态

Fig. 8　25 deformation states

$$F_{\mathrm{op}}=\sum_{j=1}^{25}\sum_{i=1}^{8}\left|f(j,i)-f_{\mathrm{FEA}}(j,i)\right| \quad (10)$$

式中:$f_{\mathrm{FEA}}(j,i)$ 为第 j 组变形状态有限元模型施加的第 i 个接触力载荷;$f(j,i)$ 为第 j 组变形状态力学模型求解的第 i 个接触力计算值。

粒子群算法具有简单易行、收敛速度快、设置参数少等优点[28],但是在进行复杂高维函数优化时存在着易陷入局部最优、迭代后期粒子停滞和精度较差等缺点。针对上述问题,本研究在粒子群算法的基础上进行如下改进[29-30]:利用混沌序列产生大量初始粒子,挑选优适应度粒子作为初始种群;当最优粒子停滞时对最优粒子进行混沌变换;采用线性递减惯性权重;将飞越边界的粒子随机置于搜索空间内,改进的粒子群算法流程如图 9 所示。

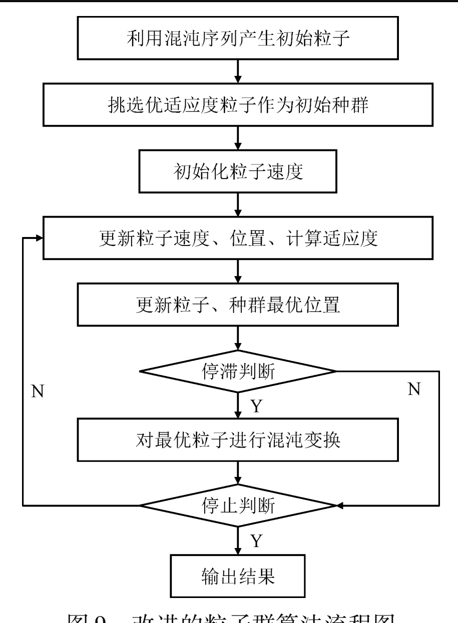


图 9　改进的粒子群算法流程图

Fig. 9　Flow chart of improved PSO algorithm

2.3　优化结果与分析

于 Matlab 环境编写算法程序，迭代得到各级四杆机构扭簧劲度系数。观察图 10，发现从安装端到末端，各级四杆机构扭簧劲度系数大致呈减小趋势。第 1 级四杆机构扭簧劲度系数明显大于其余各级，这是因为软体手指安装端受连接块约束，刚度大；而第 4、5 级劲度系数略微增大，是因为尽管逐渐远离安装端，但该位置四杆机构结构趋于紧凑，综合两者因素后刚度略微提高；而第 5 级后则靠近末端，与安装端距离过远，所以刚度低，劲度系数逐级减小。将优化求解所得的各级四杆机构扭簧劲度系数回代入式(8)，根据式(11)可求得各组变形状态软体手指力学模型接触力与有限元模型各位置接触力载荷大小之和的相对误差 $\gamma(j)$ 。如图 11 所示，本研究建立的力学模型计算接触力总和相比有限元模型会偏大，各组相对误差均在 20% 以内。

$$\gamma(j) = \frac{\sum_{i=1}^{8}\left(f(j,i) - f_{\mathrm{FEA}}(j,i)\right)}{\sum_{i=1}^{8} f_{\mathrm{FEA}}(j,i)} \tag{11}$$

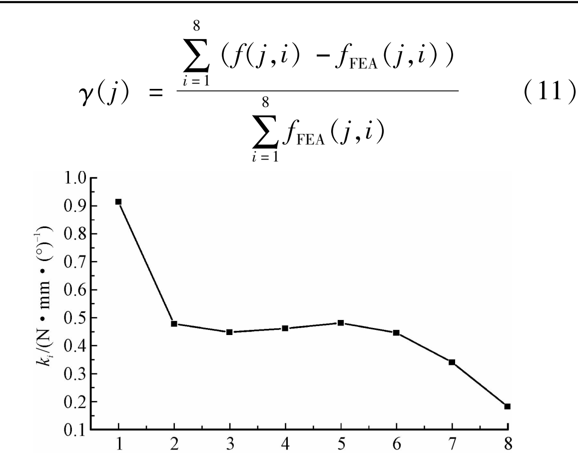


图 10　各级四杆机构扭簧劲度系数

Fig. 10　Stiffness coefficient of springs in four-bar mechanisms

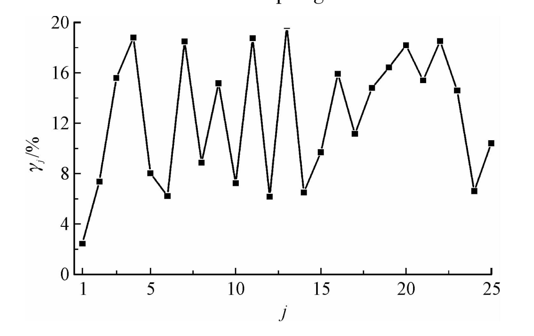


图 11　接触力相对误差

Fig. 11　Relative error of contact force of each group

2.4　气动弯曲关节静态特性建模

在 2.1 ~ 2.3 节中已建立鳍条效应软体手指的力学模型，软体手指为被动元件，依靠气动弯曲关节驱动，为了得到驱动力矩 T_a 和充气压力 P 的关系，本研究采用 ABAQUS 有限元分析软件对关节进行建模分析，图 12、图 13 分别展示了关节在空载时，即驱动力矩为 0 N·mm 时，不同充气压力下的仿真结果和关节在充气压力 0.25 MPa 时，不同转角 θ_{joint} 下的仿真结果。

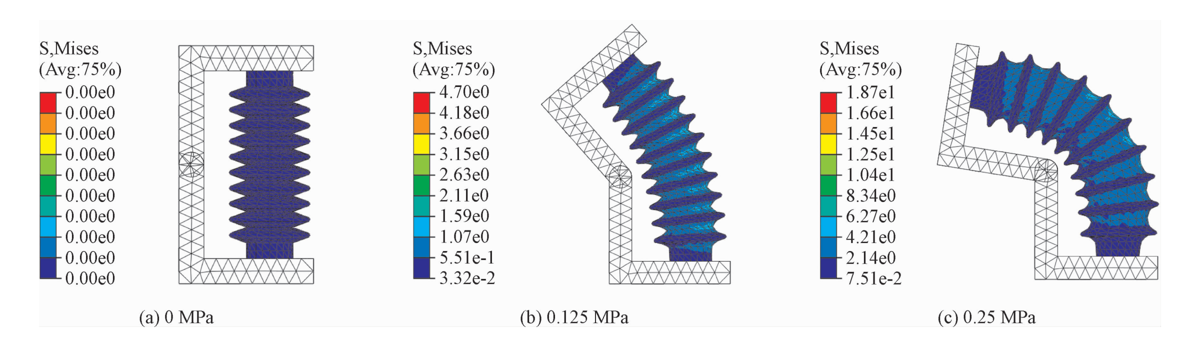


图 12　气动弯曲关节在不同压力下的仿真变形图

Fig. 12　Simulated deformation diagram of pneumatic joint under different pressure

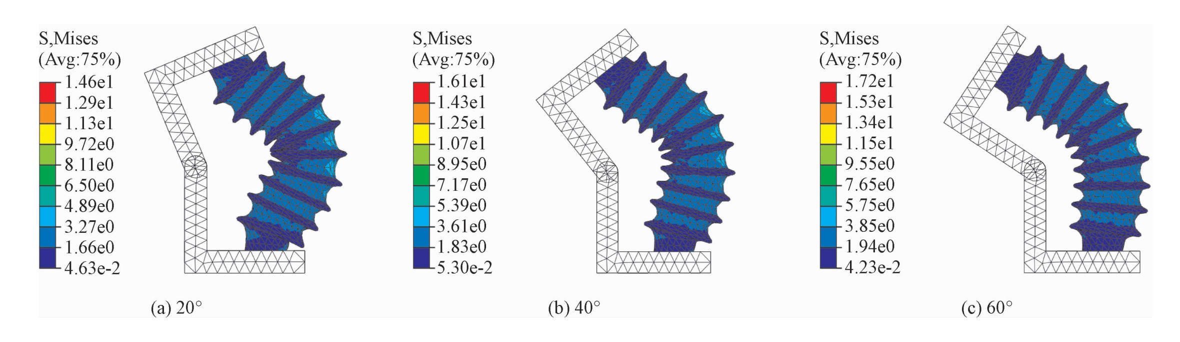


图 13　气动弯曲关节在不同转角下的仿真变形图

Fig. 13　Simulated deformation diagram of pneumatic joint at different angles

气动弯曲关节驱动力矩大小和充气压力、关节转角有关,根据常识可知充气压力一定时,关节转角越小驱动力矩越大。关节转角一定时,充气压力越大驱动力矩越大。为了对三者的关系进行量化分析,在关节有限元模型的基础上,利用 ABAQUS 二次开发接口 Python 编写程序,改变充气压力和关节转角进行自动化仿真,计算驱动力矩,自动化仿真遍历 0、0.01、…、0.25 MPa 共 26 个气压和每个气压下的 23 个转角,得到 598 条数据。以充气压力和关节转角为输入,驱动力矩为输出,搭建 3 层 BP 神经网络,将样本数据训练后得到气动弯曲关节静态模型。运用模型计算关节在给定转角不同气压下的驱动力矩,结果如图 14 所示,图中共有 5 条曲线,从下到上表示自 20° ~ 60°,以 10°递增各转角下驱动力矩随充气压力的变化关系,可以发现转角一定时驱动力矩随着充气压力的增大近似线性增大。

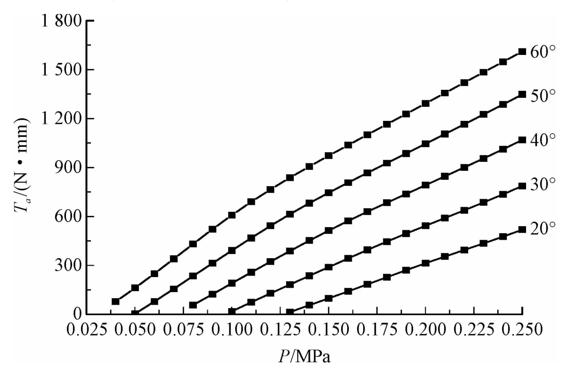


图 14　不同转角下驱动力矩与充气压力关系曲线

Fig. 14　Pressure-actuating torque curve of joint at different angles

3　试验验证

3.1　机械手抓取力测量试验

通过虚功原理推导、粒子群算法求解扭簧劲度系数,已经得到了一套完整的软体手指力学模型,经 2.3 节回代校验,已初步证明该模型可以较好地描述不同变形状态下软体手指力与变形的关系。为了进一步验证模型的准确性,制作软体采摘机械手样机并搭建试验平台(图 15)。选取 3 个形状较为标准、大小依序增大的山东烟台红富士苹果,进行三维扫描,利用 Geomagic studio 完成逆向建模设计,通过 3D 打印得到仿真苹果,将 ATI Nano-25E 六轴力/力矩传感器安装于仿真苹果内部用于测量抓取力。

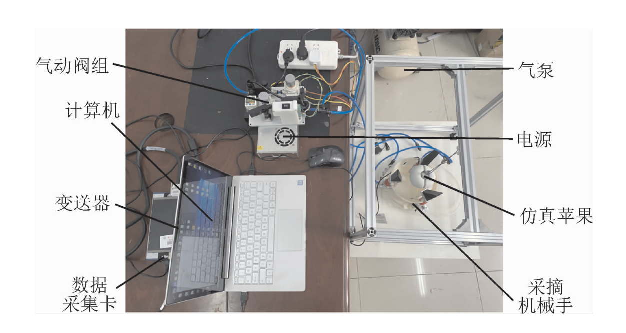


图 15　软体采摘机械手试验平台

Fig. 15　Soft robotic picking hand experiment platform

三指机械手具有良好的自定心能力,可以确保苹果位于机械手的对称轴上,但在采摘时由于视觉定位误差等原因,苹果相对机械手的高度位置 h 会在一定范围内变化,因此将 3 个仿真苹果依次通过软绳悬吊于机械手 3 个气动弯曲关节的上、下连杆铰链所在平面上方 95、100、105 mm,3 个不同高度位置处,如图 16(a)所示,共进行 9 次抓取试验。手动调节调压阀控制气动弯曲关节充气压力,使每次抓取关节转角均为 30°,图 16(b)、(c)、(d)展示了机械手在 3 个不同高度位置下对 1 号苹果的抓取状态,可见软体手指均能对苹果实现良好的包络贴合,2 号、3 号苹果尺寸大于 1 号苹果,在其余 6 次试验中软体手指也能对苹果形成较好地包络。

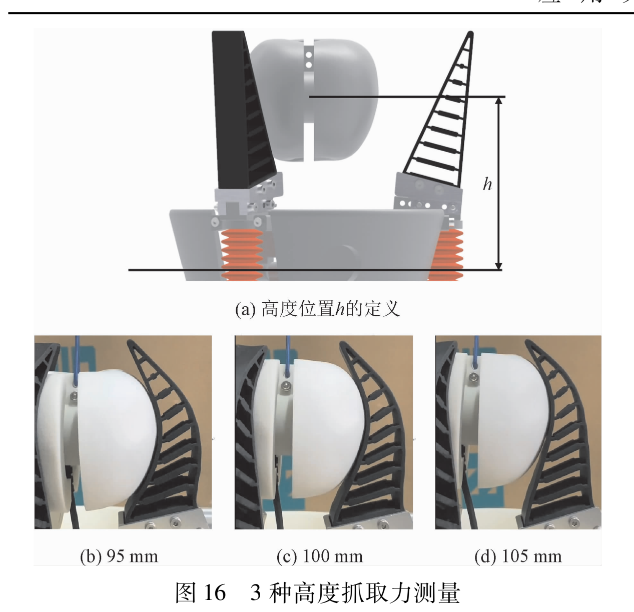


图 16　3 种高度抓取力测量

Fig. 16　Grip force measurement at three different heights

图 17 以 1 号苹果悬挂在 95 mm 高度位置处为例,抓取力测量试验通过有限元模型和力学模型进行仿真模拟,有限元模型抓取力计算值 F_{FEA} 可以直接于后处理模块读出,力学模型抓取力计算值 F_{statics} 通过式(12)求得。将每组试验抓取力测量值 F_{grip} 和相对应的 F_{FEA} 、F_{statics} 记录于图 18 中。

$$F_{\mathrm{statics}}=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{8} f_i\cos\frac{\theta_{fi}+\theta_{fi+1}}{2}\right)^2+\left(\sum_{i=1}^{8} f_i\sin\frac{\theta_{fi}+\theta_{fi+1}}{2}\right)^2} \tag{12}$$

观察试验结果,发现在各条件下鳍条效应软体采摘机械手对苹果的抓取力在 11.33 ~ 19.73 N之间,在同一高度位置和相同关节转角下,苹果大小越大,软体手指对苹果果实的抓取力越大;相同苹果在相同关节转角下,高度位置越大,即越靠近软体手指末端,抓取力越小。比较各组试验抓取力测量值和对应的两模型计算值,力学模型相对误差绝对值在 8.6% 以内,与有限元模型精度相当。

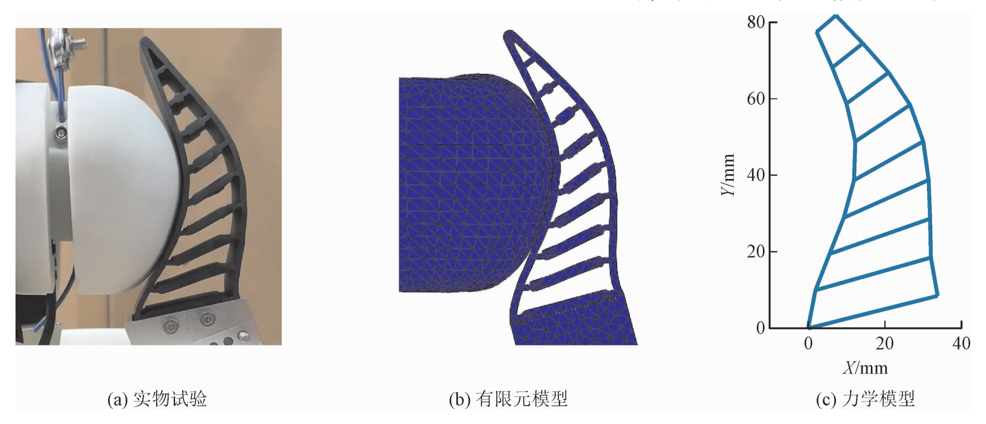


图 17　抓取力测量试验与仿真模拟

Fig. 17　Grip force measuring experiment and simulation

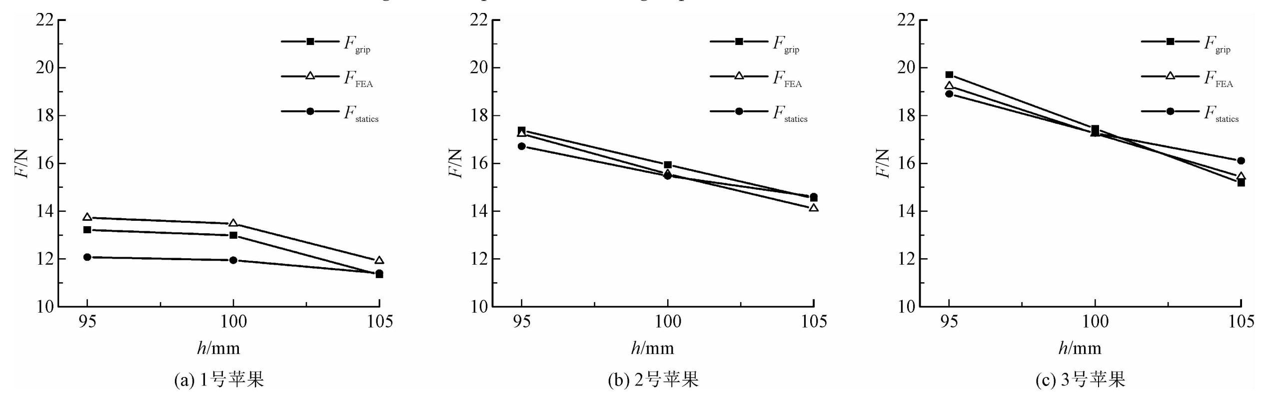


图 18　机械手对苹果在不同高度位置的抓取力

Fig. 18　Grip force at different heights

采摘苹果时,机械手通过拧断实现果实与果梗的分离,拧断果梗的扭力矩依靠软体手指对苹果的摩擦力产生,考虑软体手指抓取力与机械手对称轴的法平面存在微小的夹角 α 。要稳定采摘苹果且不产生损伤,单指抓取力必须满足约束式

$$\begin{cases} T<3\times F\times\cos\alpha\times\mu\times r \\ F<F_{\max} \end{cases} \tag{13}$$

式中: T 为拧断扭力矩; F 为软体手指抓取力; μ 为

软体手指与苹果摩擦系数；r 为苹果半径；F_{max} 为安全抓取力。

经摩擦试验和扭转试验，测得 $\mu=0.5$，$T=70\ \text{N}\cdot\text{mm}$，代入式(13)得最小抓取力为 1.56 N，考虑到一定的可靠性，抓取力应不小于 5 N；红富士苹果采摘期的果肉硬度 $P=1\ \text{N/mm}^2$，机械手抓取苹果时软体手指能与苹果果实表面充分接触，通过有限元后处理模块读出接触面积 S 约为 60 mm^2，则最大抓取力即安全抓取力 $F_{max}=P\times S=60$ N。对比试验结果，可知软体采摘机械手抓取力可满足拧断分离的需要，且不会对果实造成损伤。

3.2　关节驱动力矩测量试验

对气动弯曲关节的分析建模是基于 ABAQUS 有限元模型展开的，为了验证分析的可靠性，进行关节静态试验，图 19(a)为所搭建的试验平台。调节关节和压力传感器位置，通过 AS5600 磁旋转编码器模块保证关节转角为 30°，从 0.13 MPa 开始，以 0.01 MPa 为步长逐渐增加充气压力至 0.25 MPa，每次调节气压后等待气压传感器和压力传感器读数稳定后记录关节驱动力矩，以避免柔性波纹管的迟滞性对结果造成影响，试验结果如图 19(b)所示。

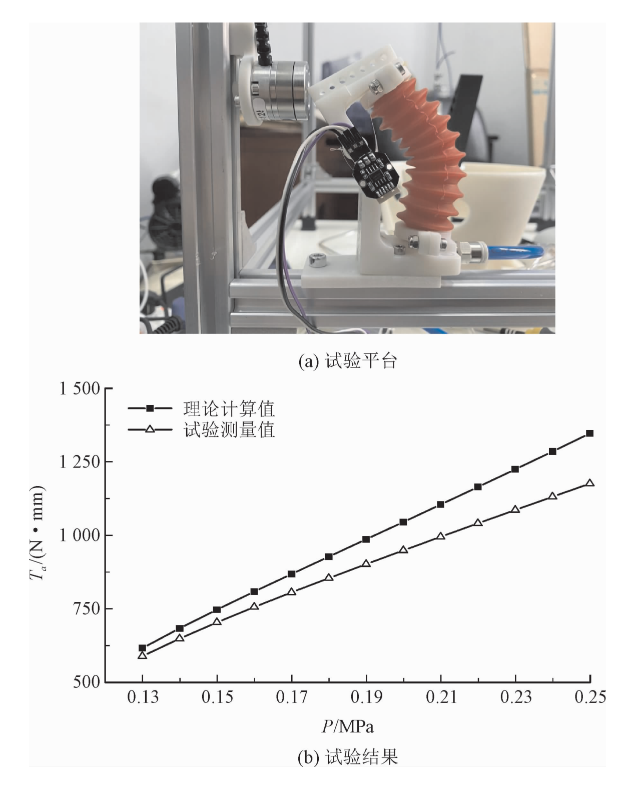


图 19　气动弯曲关节驱动力矩测量

Fig. 19　Actuating torque measurement of joint

观察试验结果发现，基于有限元分析的 BP 神经网络静态模型计算的关节驱动力矩与充气压力呈较好的线性关系，模型计算值与试验测量值整体趋势相同，略大于测量值，且随着充气压力的增大误差逐渐增大，原因在于有限元模型的材料、装配结构等无法与真实系统达到完全一致。在 0.13 MPa 时，相对误差为最小值 4.5%，在 0.25 MPa 时，相对误差达到最大值 12.7%。

4　结　论

1)基于二参数 Mooney-Rivlin 本构模型对鳍条效应软体手指进行仿真，发现抓取时软体手指变形主要发生在横梁两端与手指前、后面的连接处，提出将软体手指等效为串连铰链四杆机构。

2)运用虚功原理推导了软体手指各处接触力、驱动力矩与手指几何参数、变形状态、变形恢复力矩的关系，以线弹性扭簧模型描述恢复力矩，并用改进的粒子群算法求解各级四杆机构扭簧劲度系数，结果表明从安装端到末端劲度系数呈现减小，略微增大再减小的趋势；基于 ABAQUS 有限元分析、二次开发和 BP 神经网络建立了气动弯曲关节静态模型，得到了关节驱动力矩和充气压力、关节转角的关系，结果表明在给定转角下，驱动力矩随着充气压力增大近似线性增大。

3)搭建试验平台对不同大小苹果在不同高度位置处进行抓取力测量试验，并将试验测量值与本研究所建立的力学模型和 ABAQUS 有限元模型两种模型的计算值相比较。结果表明在同一高度位置和相同关节转角下，苹果越大则抓取力越大，同一苹果在相同关节转角下，苹果越靠近软体手指末端则抓取力越小，软体手指抓取力可满足无损抓取并拧断果梗实现采摘的需要；本研究所建立的力学模型计算抓取力相对误差绝对值不大于 8.6%，与有限元模型精度相当；测量 30°转角时关节的驱动力矩，比较发现相对误差小于 12.7%。

4)本研究建立的力学模型能够根据变形计算鳍条效应软体采摘机械手的抓取力，在保证精度的前提下，相较于有限元方法大幅减少了运算量，为鳍条效应软体采摘机械手力控制提供了理论基础。

参考文献：

[1]　HUGHES J, CULHA U, GIARDINA F, et al. Soft manipulators and

grippers:a review[J]. Frontiers in robotics and AI,2016,3:69.

[2] 张进华,王韬,洪军,等. 软体机械手研究综述[J]. 机械工程学报,2017,53(13):19-28.
ZHANG Jinhua,WANG Tao,HONG Jun,et al. Review of soft-bodied manipulator[J]. Journal of mechanical engineering,2017,53(13):19-28(in Chinese).

[3] SCHMITT F,PICCIN O,BARBÉ L,et al. Soft robots manufacturing:A review[J]. Frontiers in robotics and AI,2018,5:84.

[4] 管清华,孙健,刘彦菊,等. 气动软体机器人发展现状与趋势[J]. 中国科学(技术科学),2020,50(7):897-934.
GUAN Qinghua,SUN Jian,LIU Yanju,et al. Status of and trends in soft pneumatic robotics[J]. Scientia Sinica(technologica),2020,50(7):897-934(in Chinese).

[5] PFAFF O,SIMEONOV S,CIROVIC I,et al. Application of fin ray effect approach for production process automation[J]. Annals of daaam & proceedings,2011,22(1):1247-1249.

[6] DEVI M A,UDUPA G,SREEDHARAN P. A novel underactuated multi-fingered soft robotic hand for prosthetic application[J]. Robotics and autonomous systems,2018,100:267-277.

[7] KRAHN J M,FABBRO F,MENON C. A soft-touch gripper for grasping delicate objects[J]. LEEE/ASME transactions on mechatronics,2017,22(3):1276-1286.

[8] WEHNER M,TRUBY R L,FITZGERALD D J,et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft,autonomous robots[J]. Nature,2016,536(7617):451-455.

[9] 彭艳,刘勇敢,杨扬,等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2018,34(9):11-20.
PENG Yan,LIU Yonggan,YANG Yang,et al. Research progress on application of soft robotic gripper in fruit and vegetable picking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(9):11-20(in Chinese).

[10] 贾江鸣,叶玉泽,程培林,等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. 农业机械学报,2021,52(6):26-34.
JIA Jiangming,YE Yuze,CHENG Peilin,et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):26-34(in Chinese).

[11] 卢伟,王鹏,王玲,等. 褐菇无损采摘柔性手爪设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11):28-36.
LU Wei,WANG Peng,WANG Ling,et al. Design and experiment of flexible gripper for mushroom non-destructive picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):28-36(in Chinese).

[12] 张晗. 气动软体机械手抓取性能研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.

[13] 范需,戴宁,王宏涛,等. 气动网格软体驱动器弯曲变形预测方法[J]. 中国机械工程,2020,31(9):1108-1114.
FAN Xu,DAI Ning,WANG Hongtao,et al. Bending deformation prediction method of soft actuators with pneumatic networks[J]. China mechanical engineering,2020,31(9):1108-1114(in Chinese).

[14] BANNASCH R,KNIESE L. Manipulator tool and holding and/or expanding tool with at least one manipulator tool:US 8333417 B2[P]. 2012-12-18.

[15] HEMMING J,BAC C W,VAN TUIJL B A J,et al. A robot for harvesting sweet-pepper in greenhouses[C]//Proceedings International Conference of Agricultural Engineering. Brussels:EurAgEng,2014:C01140001.

[16] KÖLLE L,SCHWARZ O. Bionic forceps for the handling of sensitive tissue[J]. Current directions in biomedical engineering,2016,2(1):91-93.

[17] FISCHINGER D,EINRAMHOF P,PAPOUTSAKIS K,et al. Hobbit,a care robot supporting independent living at home:First prototype and lessons learned[J]. Robotics and autonomous systems,2016,75:60-78.

[18] SHAN X W,BIRGLEN L. Modeling and analysis of soft robotic fingers using the fin ray effect[J]. The international journal of robotics research,2020,39(14):1686-1705.

[19] ELGENEIDY K,LIGHTBODY P,PEARSON S,et al. Characterising 3D-printed soft fin ray robotic fingers with layer jamming capability for delicate grasping[C]//2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics(RoboSoft). Piscataway,NJ,USA:IEEE,2019:143-148.

[20] XU W F,ZHANG H,ZHENG N J,et al. Design and experiments of a compliant adaptive grasper based on fish fin structure[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics(ROBIO). Piscataway,NJ,USA:IEEE,2018:293-298.

[21] 金波,林龙贤. 果蔬采摘欠驱动机械手爪设计及其力控制[J]. 机械工程学报,2014,50(19):1-8.
JIN Bo,LIN Longxian. Design and force control of an underactuated robotic hand for fruit and vegetable picking[J]. Journal of mechanical engineering,2014,50(19):1-8(in Chinese).

[22] BASSON C I,BRIGHT G,WALKER A J. Testing flexible grippers for geometric and surface grasping conformity in reconfigurable assembly systems[J]. South African journal of industrial engineering,2018,29(1):128-142.

[23] CROOKS W,VUKASIN G,O'SULLIVAN M,et al. Fin ray© effect inspired soft robotic gripper:From the robosoft grand challenge toward optimization[J]. Frontiers in robotics and AI,2016,3:70.

[24] RIVLIN R S. Large elastic deformations of isotropic materials. I. Fundamental concepts[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A,mathematical and physical sciences,

1948,240(822):459-490.

[25] 王友善,王锋,王浩. 超弹性本构模型在轮胎有限元分析中的应用[J]. 轮胎工业,2009,29(5):277-282.
WANG Youshan,WANG Feng,WANG Hao. Application of hyperelastic constitutive models in finite element analysis on tires[J]. Tire industry,2009,29(5):277-282(in Chinese).

[26] 杨春雷,李斌,郑旭,等. 考虑工作温度的封隔器橡胶密封性和可靠性评价[J]. 应用力学学报,2017,34(6):1079-1085.
YANG Chunlei,LI Bin,ZHENG Xu,et al. The evaluation of sealing and reliability of packer rubber based on working temperature[J]. Chinese journal of applied mechanics,2017,34(6):1079-1085(in Chinese).

[27] KENNEDY J,EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. Piscataway,NJ,USA:IEEE,1995:1942-1948.

[28] LIU B,WANG L,JIN Y H,et al. Improved particle swarm optimization combined with chaos[J]. Chaos solitons & fractals,2005,25(5):1261-1271.

[29] 陈贵敏,贾建援,韩琪. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究[J]. 西安交通大学学报,2006,40(1):53-56.
CHEN Guimin,JIA Jianyuan,HAN Qi. Study on the strategy of decreasing inertia weight in particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2006,40(1):53-56(in Chinese).

[30] 王文丰,宋勇,韩龙哲,等. 一种改进的粒子群算法的路径规划研究[J]. 小型微型计算机系统,2019,40(12):2614-2618.
WANG Wenfeng,SONG Yong,HAN Longzhe,et al. Improved particle swarm optimization algorithm on path planning[J]. Journal of Chinese computer systems,2019,40(12):2614-2618(in Chinese).

(编辑　李坤璐)

